

新型転換炉燃料の高燃焼化に関する炉物理的研究

著者	若林 利男
号	761
発行年	1984
URL	http://hdl.handle.net/10097/11710

氏 名	わか 若 ばやし 林 とし 利 お 男
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 60 年 2 月 13 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 48 年 3 月 東北大学大学院工学研究科原子核工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	新型転換炉燃料の高燃焼化に関する炉物理的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 平川 直弘 東北大学教授 梶山 一典 東北大学教授 井上 泰

論 文 内 容 要 旨

ここで考察する新型転換炉は重水減速沸騰軽水冷却の圧力管型原子炉である。

新型転換炉は中性子経済の優れた重水を減速材として使用するため、微濃縮度（1.5 wt %程度）から軽水炉並濃縮度（2.5 wt %程度）までの広範囲な濃縮度のウラン及びプルトニウムを燃料として使用できるという燃料利用多様性の優れた原子炉である。このような原子炉においては、高燃焼度（現在の軽水炉では約 30,000 MWD/T 以上を目標としている）を得るために濃縮度を増加させると余剰反応度が大きくなり、その抑制方法と燃料交換時の出力ミスマッチ（バッチ燃料交換の場合、新燃料とその近傍の旧燃料の間の反応度差が大きくなり出力ピーキングがおきる。これを出力ミスマッチと言い、その大きさを出力ピーキング係数で表わす。）の抑制が大きな課題となる。これらの抑制には、新型転換炉では重水中に中性子吸収材としてのほう素を添加する方法及び制御棒を配置する方法等が考えられる。しかし、重水中にほう素を添加する方法は、余剰反応度の抑制には効果的であるが燃料交換時の出力ミスマッチの制御には利用できず、また多量のほう素を重水中に添加すると初期炉心における安全上及び運転制御上重要な冷却材ボイド反応度やボイド係数及び出力係数等を不安全側にすることが認められている。これに対して、制御棒による制御方法は出力ミスマッチの抑制には効果的であるが、全炉心の出力ミスマッチの抑制を行うには多数の高価な制御棒が必要となり建設費や運転保守費の高騰を招く。さらに、制御棒の軸方向移動に伴う出力変動は燃料健全性の点からも好ましくない。（PCI（ペレット－被覆管相互作用）に起因する燃料破損の

可能性がある。)

このような問題点を解決する手段としては、燃料中にガドリニウム等のバーナブルポイズンを添加して燃焼初期の余剰反応度を抑制するとともに、燃料交換時における出力ミスマッチを改善する方法が考えられる。バーナブルポイズンは燃料棒中に添加することが主に考えられるが、新型転換炉では燃料集合体中心部の吸収棒に添加することにより、冷却材ボイド反応度の改善が期待される。軽水炉についてはすでにバーナブルポイズンを使用した例があり、多くの臨界実験や発電用商業炉での使用実績を基に、その特性の解明や設計計算コードの精度評価が十分に行われてきた。これに対して、新型転換炉を含めた重水炉においては、今まで実験による特性の解明やその実験解析を基にした設計コードの精度評価は行われていなかった。

本研究は、クラスター型燃料集合体にガドリニウム等のバーナブルポイズンを使用した場合の核特性のうち、余剰反応度や出力ミスマッチの抑制効果を評価する時の基礎となる反応度抑制効果、出力分布、燃焼に伴うバーナブルポイズンの消滅を評価するために必要な燃料中の中性子束分布及び安全上重要な冷却材ボイド反応度に着目し、臨界実験によるこれらの特性の解明、計算コードを用いた臨界実験結果の解析による計算精度の評価と解析手法の確立及びそれらを基にして新型転換炉の燃料集合体にバーナブルポイズンを使用する場合の設計指針を与えることを目的とした。

更に、バーナブルポイズンの新しい使用法として、燃料集合体中心部にバーナブルポイズンとして吸収棒を配置した燃料集合体について、その特性を解明し、その設計指針を確立することを目的とした。本論文は、全編5章から成る。

第1章は緒論であり、新型転換炉の核燃料サイクル上の位置づけとその核特性を述べ、バーナブルポイズンを使用する必要性とその問題点を示し本研究の目的を明らかにした。また、冷却材ボイド反応度のメカニズムを論ずることにより、バーナブルポイズンを燃料以外の燃料集合体中心部の構造物に添加する新しい構造の燃料集合体を示した。

第2章では1体燃料集合体を用いた臨界実験により、バーナブルポイズンとして使用される中性子吸収材(ガドリニウム、カドミウム等、燃料棒内にはガドリニア(Gd_2O_3)で添加される。)の核特性を解明した。Fig.1に中性子吸収材の燃料集合体内の配置図を示す。

その核特性は次の通りである。

- (1) 燃料中に添加したガドリニアの濃度が0.5 wt%以上になると反応度抑制効果は飽和し、その濃度を更に増加しても抑制効果は大きく変化しない。(Fig.2 参照)
- (2) 反応度抑制効果は燃料集合体内のガドリニウム入り燃料棒の挿入位置に依存し、挿入位置が燃料集合体中心に近づくに従って減少する。(Fig.3 参照)
- (3) 燃料集合体内に複数本のガドリニウム入り燃料棒を配置した場合、離れた位置に挿入されたガドリニウム入り燃料棒の反応度抑制効果は挿入本数にほぼ比例した大きさを示すが、隣接して配置された場合、反応度抑制効果は離れて配置されたガドリニウム入り燃料棒の反応度抑制効果に比べて燃料棒の相互干渉効果により約15%減少する。(Fig.4 参照)
- (4) 燃料集合体にガドリニウム入り燃料棒を配置した場合、冷却材ボイド反応度は大きく負側に移行する。

- (5) ガドリニウム入り燃料棒内の微細熱中性子束分布の測定結果から、ガドリニアの濃度が0.5 wt%以上になると燃料棒内の熱中性子束低下は飽和することがわかった。これは、ガドリニウムの熱中性子自己遮蔽効果が飽和するためであり、反応度抑制効果が0.5 wt%以上で飽和するという実験結果と一致する。(Fig.5 参照)
- (6) 燃料集合体の中心に挿入された中性子吸収棒(ガドリニウム又はガドミウム入り)は、反応度抑制に効果的であるばかりでなく冷却材ボイド反応度も大きく負に移行させる。また、この燃料集合体は局所ピーキング係数に大きな影響を与えず核熱特性上優れた特性を持つ燃料集合体であることが実験的に証明された。
- (7) ガドリニウム吸収棒が冷却材ボイド反応度を負にする理由は、燃料集合体中心に挿入されたガドリニウム吸収棒が、冷却材チャンネルが100%ボイドになった場合の熱中性子利用率の増加を抑制するためである。

臨界実験により解明された核特性はバーナブルポイズン入り燃料集合体設計の基本となるものである。

第3章では、第2章の臨界実験で求めた核特性の結果を新型転換炉の核設計計算に用いられているコードで解析し、計算精度の評価と解析手法の確立を行った。その結果、次の事項を示すことができた。

- (1) WIMSコードを用いてバーナブルポイズン入り燃料集合体の核設計を行う場合、バーナブルポイズン入り燃料棒内を細かく分割しなければ、燃焼に伴う反応度変化や中性子束分布を正確に評価することができない。バーナブルポイズンとしてガドリニウムを使用する場合、燃料棒内及び吸収棒内の分割はガドリニアの濃度が0.5 wt%以上では等体積に5分割すれば十分である。
- (2) WIMSコードを用いてバーナブルポイズン入り燃料集合体の設計を行う場合の設計誤差は、燃料棒内及び吸収棒内の領域を5領域に分割した場合、反応度に関しては $\pm 9\%$ (Fig.2~4 参照)、燃料集合体内平均中性子束に関しては $\pm 8\%$ 、局所出力ピーキング係数に関しては $\pm 4\%$ である。

第4章では、第2章で解明されたバーナブルポイズンとしての中性子吸収材の核特性、第3章で確立された解析手法を基にして、実際の燃料集合体に着目し燃焼を含めた計算により核特性の評価を行い、新型転換炉にバーナブルポイズンを使用する場合について次の設計指針を与えた。

- (1) 出力ピーキング係数を10~15%抑制する場合、燃料集合体内で出力の低い内層及び中間層に高い濃度(1~2 wt%)のバーナブルポイズンを少数本(3~6本)配置する。
- (2) 出力ピーキング係数を5%程度抑制する場合、燃料集合体中心部にバーナブルポイズン入り吸収棒を配置する。
- (3) 出力ピーキング係数を20%以上抑制する場合、バーナブルポイズン入りの吸収棒と燃料棒を組合せて使用しバーナブルポイズン入り燃料棒は最外層に様に配置する。
- (4) ガドリニウムをバーナブルポイズンとしてを使用する場合、ガドリニアの濃度が0.5 wt%以上では反応度抑制効果は飽和し、それ以上の添加は反応度抑制には効果的でないが、燃焼に伴う

反応度抑制効果を長く持続させるには高い濃度のガドリニアの添加は有効である。ガドリニウムによる反応度抑制効果がなくなる燃焼度は、燃料濃縮度や配置によって異なるが、中間層に配置した場合の目安としては約 4,000 MWD/T/1 wt % Gd₂O₃ となる。

- (5) バーナブルポイズン濃度決定のために考慮しなければならない事項として、バーナブルポイズンがほとんど燃焼した時点における安全上及び運転制御上重要な核特性がある。冷却材ボイド反応度、出力係数等核特性が設計条件の範囲内にあることが必要である。
- (6) WIMS コードを用いてバーナブルポイズン入り燃料集合体の設計を行う場合の設計誤差は、燃料棒内を 5 領域に分割した場合、反応度に関しては ± 9 %，燃料集合体内平均中性子束に関しては ± 8 %，局所出力ピーキング係数に関しては ± 4 % であり，設計はこの誤差を考慮して行う。

第 5 章は結論である。

本研究により，クラスター型燃料集合体にガドリニウムバーナブルポイズンを使用した場合の核特性の解明，設計コードの計算精度の評価及び設計指針の確立が行え，新型転換炉においてバーナブルポイズンの特性を生かした設計が行なえることが判明した。

また，本研究により考案した燃料集合体中心部にバーナブルポイズン吸収棒を配置した燃料集合体は，局所ピーキングに悪影響を与えずに反応度抑制効果と冷却材ボイド反応度の改善が行える点で非常に有効であることが判明した。

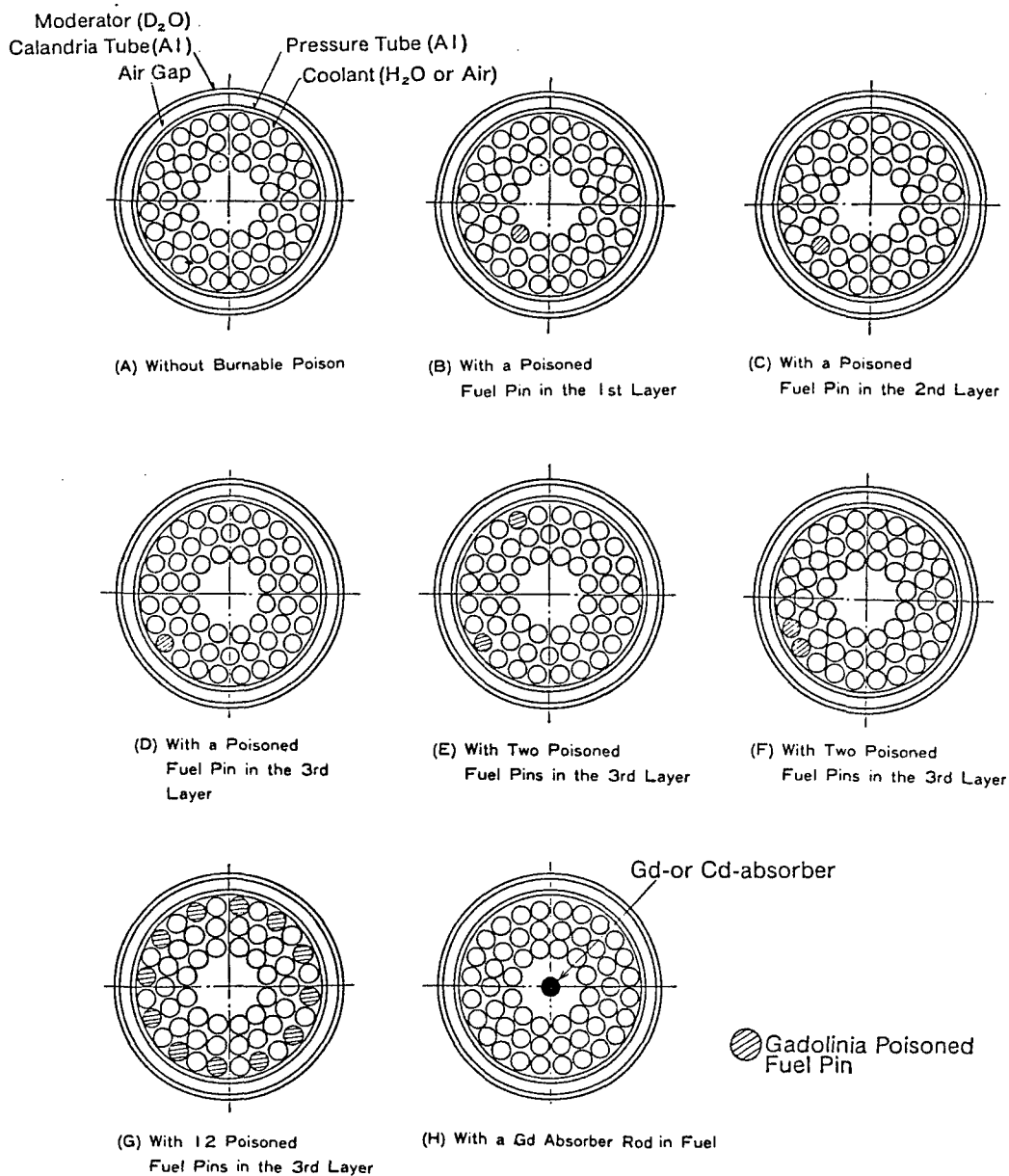


Fig. 1 Absorber Rod Arrangement in 54-pin Cluster

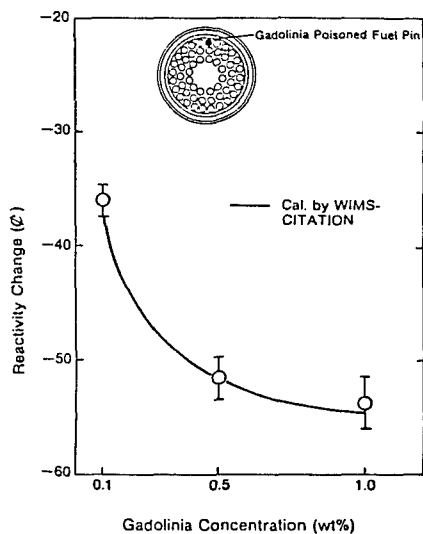


Fig. 2 Reactivity Change Depending on Change in Gadolinia Concentration

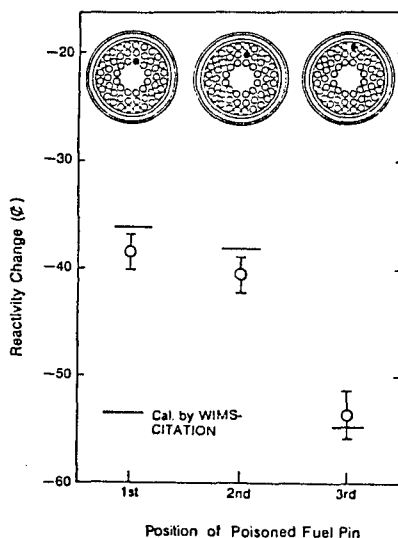


Fig. 3 Dependence of Reactivity Change on Configuration in Fuel Cluster (1.0 wt% Gd_2O_3)

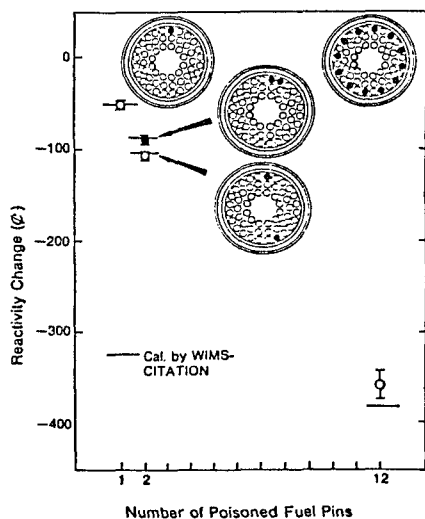


Fig. 4 Dependence of Reactivity Change on the Number of Poisoned Fuel Pins (1.0 wt% Gd_2O_3)

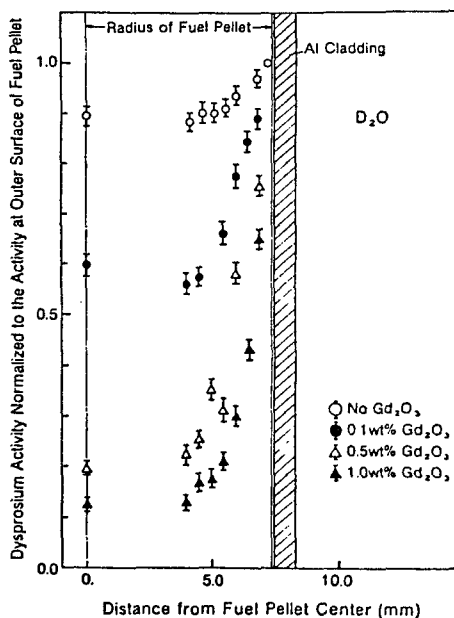


Fig. 5 Fine Structure of Dysprosium Reaction Rate Distributions in Fuel Pellet

審 査 結 果 の 要 旨

軽水炉の運転に伴って生成するプルトニウムを有効利用出来る原子炉として、わが国では新型転換炉と呼ばれる重水減速沸騰軽水冷却圧力管型原子炉の開発を行っている。この型の原子炉は、燃料の濃縮度を増加させると運転初期の余剰反応度及び出力ミスマッチ（燃料交換の際、新燃料とその近傍の旧燃料との間の反応度差によって生ずる出力ピーキング）が過大となるので、燃料の高燃焼化を図るためには、これらを抑制することが必要である。

本論文は、可燃性毒物として Gd を添加することによって、新型転換炉の余剰反応度と出力ミスマッチを抑制することを目的として行った一連の研究の成果をまとめたもので、全文 5 章より成る。

第 1 章は緒論である。

第 2 章では、重水臨界実験装置において、その中心に 1 体のクラスター型燃料集合体を配置して行った臨界実験について述べている。すなわち、冷却材ボイド率、Gd を添加した燃料棒（以下 Gd 燃料棒）中の Gd 濃度、Gd 燃料棒の集合体内の挿入位置と挿入本数をパラメータとして、反応度抑制効果、熱中性子束分布及び出力分布の測定を行い、中性子吸収体としての Gd の核特性を解明するとともに、これらの核特性を生ずる原因を熱中性子束分布により説明している。また著者は、Gd 燃料棒に加えて中心に Gd 吸収棒を配置した燃料集合体を考案し、この燃料集合体が、局所出力ピーキング係数に大きな影響を与えることなく、冷却材ボイド係数を大きな負の値にすることを実験的に見出している。これは新型転換炉の安全設計上重要な知見である。

第 3 章では、核設計計算コード WIMS に Gd の核断面積データを追加して、第 2 章で述べた実験の解析を行い、計算精度を評価している。その結果、解析精度は、反応度に関して $\pm 9\%$ 、燃料集合体内平均中性子束に関して $\pm 8\%$ 、局所出力ピーキング係数に関して $\pm 4\%$ であることが示されている。これらの誤差は、現在運転中の原型炉「ふげん」に対する解析誤差と同程度であって、本研究で用いた解析手法によって、可燃性毒物入りの燃料集合体の設計を行い得ることを示すものである。

第 4 章では、実証炉以降に使用される燃料集合体を想定して、反応度抑制効果、局所出力ピーキング係数及び冷却材ボイド反応度の燃焼に伴う変化を解析している。その結果、抑制すべき出力ピーキング係数の大きさに対応した可燃性毒物の燃料集合体内配置についての設計指針を与えている。更に、Gd 燃料棒と Gd 吸収棒を組合せた燃料集合体が、反応度の抑制とその持続性の点で優れているのみならず、燃焼期間を通じて、一定の大きな負の冷却材ボイド反応度を保つことを示している。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、新型転換炉の燃料集合体に、可燃性毒物として Gd を使用する場合は原子炉の核特性を、実験及び解析により解明し、可燃性毒物の特性を活かした設計によって、新型転換炉燃料の高燃焼化を達成し得ることを示したものであって、原子核工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。